

Е. В. ПАРУСОВ, С. І. ГУБЕНКО, О. В. ПАРУСОВ, І. М. ЧУЙКО⁷

РОЗРОБКА СУЧАСНОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО СПОСОБУ ВИРОБНИЦТВА ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНОЇ АРМАТУРИ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розроблена енергозберігаюча технологія виробництва холоднодеформованої стабілізованої арматури зі сталі С86D (5,0Bp1400-P1; 6,0Bp1400-P1; 5,0B1500-P1), яка призначена для виготовлення попередньо-напружених залізобетонних конструкцій, в тому числі для виробництва канатів типу 2Л, які використовуються для захисних оболонок огороження конструкції локалізуючої системи безпеки атомних електростанцій. Виготовлена арматура діаметром 5,0–6,0 мм відповідає вимогам зарубіжних стандартів EN 10138-2:2009, BS 5896:1980, NEN 3868:2001 та MSZ 5720:1993. Доведена можливість виготовлення за скороченою технологічною схемою холоднодеформованої стабілізованої арматури діаметром 9,6 мм зі сталі С82D^V, що дозволяє при армуванні залізобетонних шпал суттєво скоротити витрати металу ~ на 7 %. Результати досліджень свідчать про те, що одним з перспективних напрямків подальших досліджень при виробництві холоднодеформованої арматури діаметром 9,6 мм є освоєння технології виробництва бунтового прокату діаметром 15,0–16,0 мм зі сталі С86D, однак це потребує модернізації діючих ліній повітряного охолодження металургійних підприємств.

Ключові слова: холодна пластична деформація, бунтовий прокат, напружена арматура, клас міцності, деформаційно-термічна обробка, високовуглецева сталь/

Э. В. ПАРУСОВ, С. И. ГУБЕНКО, О. В. ПАРУСОВ, И. Н. ЧУЙКО

РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННОГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Разработана энергосберегающая технология производства холоднодеформированной стабилизированной арматуры из стали С86D (5,0Bp1400-P1; 6,0Bp1400-P1; 5,0B1500-P1), предназначенной для изготовления предварительно напряженных железобетонных конструкций, в том числе для канатов типа 2Л, используемых для защитных оболочек ограждений конструкций локализирующей системы безопасности атомных электростанций. Полученная стабилизированная арматура диаметром 5,0–6,0 мм соответствует требованиям зарубежных стандартов EN 10138-2:2009, BS 5896:1980, NEN 3868:2001 и MSZ 5720:1993. Показана возможность производства холоднодеформированной стабилизированной арматуры диаметром 9,6 мм из стали С82D^V по сокращенной технологической схеме, что позволяет при армировании железобетонных шпал существенно упростить технологию производства и сократить расход металла ~ на 7 %. Результаты исследований свидетельствуют о том, что одним из перспективных направлений дальнейших исследований, при производстве холоднодеформированной арматуры диаметром 9,6 мм, является освоение технологии производства бунтового проката диаметром 15,0–16,0 мм из стали С86D, однако это требует модернизации действующих линий воздушного охлаждения металлургических предприятий.

Ключевые слова: холодная пластическая деформация, бунтовой прокат, напрягаемая арматура, класс прочности, деформационно-термическая обработка, высокоуглеродистая сталь/

E. V. PARUSOV, S. I. GUBENKO, O. V. PARUSOV, I. N. CHUIKO

DEVELOPMENT MODERN ENERGY-EFFICIENT METHOD OF PRODUCTION OF COLD- DEFORMED ARMATURE FOR PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTION

Development energy-saving technology for the production of cold-deformed stabilized armature of steel С86D (5,0Bp1400-P1; 6,0Bp1400-P1; 5,0B1500-P1) intended for the manufacture of prestressed reinforced concrete structures, including for type 2L ropes used for protective fencing designs of the localizing system of safety of nuclear power plants. The resulting stabilized reinforcement with a diameter of 5.0–6.0 mm corresponds to the international standards EN 10138-2:2009, BS 5896:1980, NEN 3868:2001 and MSZ 5720:1993. The possibility of producing cold-deformed stabilized armature with a diameter of 9.6 mm steel С82D^V according to an abbreviated technological scheme is shown, which allows for the reinforcement of reinforced concrete sleepers to significantly simplify the production technology and reduce metal consumption ~ by 7%. Research results indicate that one of the promising areas for further research, in the production of cold-formed reinforcement with a diameter of 9.6 mm, is to master the technology for the production of roll-out steel with a diameter of 15.0–16.0 mm from С86D steel, but this requires upgrading the existing air cooling lines metallurgical enterprises.

Keywords: cold plastic deformation, wire rod, prestressed armature, strength class, heat and deformation treatment, high carbon steel.

Вступ. Сучасні технології виготовлення високоміцних холоднодеформованих виробів з бунтового прокату орієнтовані на скорочення металоємності конструкцій, зниження трудомісткості та матеріальних витрат. Досягти поліпшення техніко-економічних показників дозволяють більш жорсткі вимоги до якості початкової сировини – бунтового прокату з високовуглецевої сталі [1–3].

Загальні тенденції при виробництві високоміцних матеріалів, які призначені для посилення будівельних конструкцій, полягають в можливості збільшення як діаметру арматури, так і її класу міцності. Дослідження, які направлені на досягнення більш високого класу міцності холоднодеформованих виробів, потребують встановлення ефективного

впливу технологічних чинників (хімічний склад, легування або мікролегування сталі, термічний або деформаційно-термічний вплив, особливості режиму холодної пластичної деформації і завершальна термічна обробка) на формування структури сталі. Одним з головних методів зміцнення холоднодеформованих виробів є дислокаційний механізм, який обумовлений підвищенням щільності дислокацій та їх взаємодією. Очевидно, що безладне підвищення щільності дислокацій в металі не призводить до зростання конструктивної міцності, тому ефективним слід вважати збільшення кількості дислокацій з одночасним їх перерозподілом і утворенням стійких стінок комірок. Чим більше щільність дислокацій в сталі, тим вище рівень

деформаційного зміцнення, але при великих ступенях деформації в металі можуть утворюватися незворотні дефекти (субмікротріщини), які провокують суттєве зменшення механічних властивостей та передчасне руйнування будівельних конструкцій [4–6].

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. За останні роки на світових ринках зріс попит на бунтовий прокат з вуглецевої сталі, який піддається холодній пластичній деформації з великими ступенями обтиснення, для виготовлення виробів високої міцності (сталеві арматурні канати, холоднодеформована арматура періодичного та гладкого профілів, пружинний дріт, металокорд, дріт для рукавів високого тиску та сердечників сталевих алюмінієвих неізолюваних проводів, сталеві будівельні фібри тощо). Це обумовлено модернізацією парку волочильного обладнання та постійним прагненням до вдосконалення технології виробництва метизної продукції, що спрямовано на підвищення енергоефективності та зменшення матеріальних витрат [7, 8].

Спорудження конструкцій для потреб промисловості та цивільного будівництва викликає необхідність освоєння сучасних технологій виробництва холоднодеформованої арматури класу міцності не менше 1400 МПа. Відомо, що найбільш ефективним напрямком підвищення міцності сталевих виробів є деформаційне зміцнення сталей із вмістом вуглецю 0,7–0,9 % під час холодної пластичної деформації. Однак у 90 % випадків досягнутий рівень якісних показників високовуглецевої сталі на національних металургійних заводах є недостатнім для забезпечення необхідного класу міцності холоднодеформованої арматури, тому метизні підприємства зіштовхуються з необхідністю поліпшення структури сталі перед початком деформації (волочіння) за допомогою енерговитратної термічної обробки – патентування. На металургійних підприємствах України загальні вимоги до бунтового прокату з високовуглецевої сталі регламентуються ДСТУ 3683-98 і ГОСТ 14959-79. Зазначені стандарти не нормують вміст неметалевих включень та не враховують кількісну оцінку надлишкових фаз (ферит, цементит) в структурі сталі. Згідно з ДСТУ 3683-98 допускається досить великий розмах тимчасового опору розриву, а по ГОСТ 14959-79 взагалі відсутні вимоги до механічних властивостей і оцінки структурних складових в сталі. На практиці бунтовий прокат з високовуглецевих сталей діаметром 10,0-12,0 мм має значний розбіг фактичних значень тимчасового опору розриву в межах плавки ($\sigma_B \sim 150$ МПа) та досить низькі характеристики пластичності ($\delta_{10} \leq 10$ %, $\psi \leq 22$ %).

До головних показників, які суттєво впливають на якість бунтового прокату, відносять: хімічний склад, технології розкислення, позапічної обробки та розливання сталі, температурно-часові умови нагрівання литої заготовки у печі, параметри режиму гарячої деформації та швидкість повітряного охолодження металу на транспортері лінії Стелмор.

Вказані показники при раціональному їх поєднанні дозволяють суттєво впливати на якість бунтового прокату шляхом внесення відповідних коригувань у діючий технологічний процес.

Напрямки розвитку світової металургійної галузі свідчать про те, що для підвищення вихідного класу міцності бунтового прокату слід застосовувати сталь з вмістом вуглецю 0,82–0,84 % леговану карбідоутворюючими елементами, але з точки зору економічної складової це є недоцільним. На даний час накопичено значний досвід, який пов'язаний з технологічними особливостями виготовлення високовуглецевих сталей, але незважаючи на це вони постійно перебувають під пильною увагою дослідників, тому що на практиці реалізовані не всі потенційно можливі резерви підвищення їх міцності при безперервному охолодженні з прокатного нагріву.

Приймаючи до уваги підписану угоду між Україною і Європейським Союзом про зону вільної торгівлі, розробка і впровадження на металургійних підприємствах нових технологічних рішень, достатніх для виготовлення високоякісного бунтового прокату з високовуглецевих сталей, дозволить вступити в конкурентну боротьбу на світових ринках збуту й гідно представляти металопродукцію національного виробництва.

Таким чином, дослідження, що направлені на пошук інноваційних технологічних рішень, які забезпечують ефективне поєднання структури і механічних властивостей високовуглецевих сталей без додаткового застосування енерговитратних термічних обробок, є актуальною задачею, яка відповідає пріоритетному напрямку розвитку гірничо-металургійної комплексу України.

Мета роботи. Метою роботи є розробка наскрізної технології виробництва холоднодеформованої стабілізованої арматури, яка призначена для виготовлення попередньо напружених залізобетонних конструкцій високої міцності.

Матеріал і методика досліджень. У якості матеріалу обрані промислові партії бунтового прокату зі сталі C86D (% ваг.: C = 0,88; Mn = 0,68; Si = 0,18; P = 0,010; S = 0,003; Cr = 0,03; Ni = 0,06; Cu = 0,12; N = 0,007; B = 0,0012) і C82D (% ваг.: C = 0,83; Mn = 0,69; Si = 0,19; P = 0,010; S = 0,003; Cr = 0,04; V = 0,06; Ni = 0,07; Cu = 0,11; N = 0,006; B = 0,0014). Використане обладнання: оптичний світловий мікроскоп «Axiovert M200 Mat», універсальна випробувальна машина «TTDM Instron». Механічні властивості визначали за ГОСТ 1497-84, бал і кількість сорбітоподібного перліту згідно з методиками ГОСТ 8233-56.

Результати досліджень та їх обговорення. Холоднодеформована стабілізована арматура та арматурні канати з низькою релаксацією відносяться до найбільш високоміцного різновиду арматури, що призначена для виготовлення попередньо напружених залізобетонних конструкцій. Номенклатура і показники якості арматури що виготовляється в Україні мають деякі відмінності, які пов'язані з більш низькими класами міцності, на відміну від зарубіжних аналогів. Відповідно до вимог європейського

стандарту EN 10138:2009 (частини 2, 3), який об'єднує основні різновиди напруженої арматури, передбачено виробництво: високоміцного дроту періодичного й гладкого профілю діаметром 4,0–10,0 мм з границею текучості 1300–1500 МПа і тимчасовим опором розриву 1600–1800 МПа; трьохдротяних канатів діаметром 5,2–7,5 мм з границею текучості 1600–1700 МПа і тимчасовим опором розриву 1800–1900 МПа; семидротяних канатів діаметром 7,0–18,0 мм з границею текучості 1500–1800 МПа і тимчасовим опором розриву 1770–2000 МПа. Існують також й інші міжнародні нормативні документи, якими керуються при виготовленні напруженої арматури (BS 5896:1980, NEN 3868:2001, ASTM A416M-05, NBN I 10-0030, UNI 7676, MSZ 5720:1993). Порівняльний аналіз міжнародних стандартів за вимогами до механічних властивостей свідчить про те, що всі вони приблизно однакові та залежать лише від класу міцності арматури, який визначається за тимчасовим опором розриву на відміну від національних стандартів.

В умовах України холоднодеформована арматура виготовляється у відповідності до вимог ГОСТ 7348-81 (дротяна арматура) і ГОСТ 13840-68/2004 (арматурні канати).

З огляду на те, що якісні показники бунтового прокату діаметром 8,0–12,0 мм металургійних підприємств України не дозволяють здійснити переробку металу з використанням способу прямого волочіння в високоміцний дріт, традиційна технологічна схема складається з наступних операцій: ПП (X, M) → (B, B) → K → П → ППП → B → C → ЗБ, де: ПП – підготовка поверхні прокату до волочіння, X, M – хімічний або механічний спосіб видалення окалини відповідно, B, B – нанесення підмастильного шару вапна або бури на поверхню прокату відповідно, K – калібрування прокату зі ступенем деформації до 10 %, П – термічна обробка (патентування) проміжної заготовки, ППП – повторна підготовка поверхні прокату до волочіння, B – волочіння проміжної заготовки на кінцевий діаметр дроту, C – стабілізуюча обробка (низькотемпературний відпал), ЗБ – змотування на дерев'яний барабан.

При патентуванні проміжної заготовки, головною метою якого є підвищення класу міцності сталі, виконують нагрів в прохідній печі до температур 970–1000 °C з подальшим охолодженням металу в умовах, які близькі до ізотермічних (швидке переохолодження від 970–1000 °C до 550–520 °C). У якості середовища при охолодженні сталі використовують ванни з розплавом свинцю або солей. Дифузійний розпад аустеніту при патентуванні проходить при більш низьких температурах, що забезпечує формування структури сталі з високим ступенем дисперсності перліту, яка є сприятливою для подальшої холодної

пластичної деформації прокату з великими ступенями обтиснення [9].

З метою зменшення матеріальних витрат і заощадження енергоносіїв авторами цієї роботи в умовах металургійного підприємства розроблена інноваційна технологія високотемпературної деформаційно-термічної обробки бунтового прокату з високовуглецевих сталей, у тому числі легованих карбідоутворюючими елементами (хром і/або ванадій). Наприклад, структура сталі C86D за розробленими режимами після безперервного охолодження від температур гарячої прокатки у максимальній мірі наближена до структури сталі, що була піддана патентуванню [10]. Впровадження нової технології, на відміну від діючої, дозволило зменшити глибину знеуглецьованого шару в 1,4–1,8 рази, збільшити кількість сорбітовидного перліту в 1,4 рази, виключити появу ділянок пластинчастого перліту більше 3–4 балу. Окрім зазначених відмінностей в формуванні структури сталі, запропонована технологія дозволила підвищити тимчасовий опір розриву прокату на ~ 5 %, а відносне звуження і відносне подовження на 34 і 35 % відповідно (табл. 1).

Враховуючи досягнутий рівень показників якості бунтового прокату, була запропонована скорочена технологія його переробки в холоднодеформовану арматуру, яка виключала калібрування, патентування та повторну підготовку поверхні прокату до волочіння: ПП (X, M) → (B, B) → B → C → ЗБ. Експериментальна технологія переробки бунтового прокату зі сталі C86D діаметром 8,0 мм і 10,0 мм була задіяна для виготовлення стабілізованої арматури періодичного профілю діаметром 5,0–6,0 мм Вр-Р1 для попередньо напружених залізобетонних конструкцій (ГОСТ 7348-81) і гладкого профілю діаметром 5,0 мм (ТУ У 24.3-26209430-027) – для виробництва арматурних канатів типу 2Л попередньо напружених захисних оболонок, якими обгороджують конструкції локалізуючої системи безпеки атомних електростанцій. Виробництво дротяної заготовки проходило у відповідності з діючими технологічними інструкціями метизного підприємства на прямоточному волочильному стані за 3–5 проходів. Одиницні обтиснення при виготовленні дротяної заготовки не перевищували 20 %. На завершальній стадії на поверхню дроту наносилися вм'ятини, після чого проводився стабілізуючий відпал з протидіючою напругою, величина якої не перевищувала 60 % від номінального розривного зусилля та розраховувалася в залежності від діаметру і класу міцності готових металовиробів. На лінії стабілізації зусилля витяжки створюється за рахунок різниці швидкостей обертання витяжних шківів, які розташовані до і після індукційної нагрівальної печі.

Таблиця 1. Показники якості бунтового прокату зі сталі C86D діаметром 10,0 мм

Режим технології	Кількість сорбітовидного перліту, %	Глибина знеуглецьованого шару, %	σв, МПа	ψ, %	δ ₁₀ , %
Діючий	58, інше перліт 2–6 балу	1,12	1128	21	7
Дослідний	89, інше перліт 2–3 балу	0,62	1210	31	11

Регулювання зусилля витяжки виконується вручну за показаннями приладів, що забезпечує автоматичну зміну швидкостей обертання другої пари витяжних шківів. Експериментальна технологія виробництва холоднодеформованої арматури характеризувалась високою стабільністю, обривів дроту й передчасного зношування волок не спостерігалось. Механічні властивості холоднодеформованої арматури гладкого і періодичного профілю, яка виготовлена з бунтового прокату діаметром 8,0 мм і 10,0 мм наведені у табл. 2. Вимоги до механічних властивостей стабілізованої холоднодеформованої арматури за різними нормативними документами представлені у табл. 3, 4. Порівняльний аналіз наведених даних (див. табл. 2–4) свідчить про те, що стабілізована арматура діаметром 5,0–6,0 мм, яка виготовлена за експериментальною енергозберігаючою технологією, відповідає за тимчасовим опором розриву класу міцності 1770 МПа зарубіжних стандартів EN 10138-2:2009, BS 5896:1980, NEN 3868:2001 та MSZ 5720:1993. Враховуючи позитивні результати переробки прокату зі сталі С86D, а також особливості впливу високотемпературної деформаційно-термічної обробки на структуру і механічні властивості високовуглецевих сталей [10, 11] було вирішено виготовити дослідну партію бунтового прокату діаметром 14,0 мм зі сталі С82D^V з метою виробництва стабілізованої холоднодеформованої арматури діаметром 9,6 мм, яка призначена для армування залізобетонних шпал нового покоління [3]. Механічні властивості прокату представлені у табл. 5.

Переробка бунтового прокату діаметром 14,0 мм зі сталі С82D^V в арматуру періодичного профілю діаметром 9,6 мм (ТУ 0930-011-01115863-2008) проводилась по аналогії зі сталлю С86D із застосуванням способу прямого волочіння. Виготовлення дротяної заготовки проводилось на прямоточному волочильному стані за 5 проходів, після чого наносився тристоронній профіль і проводився

стабілізуючий відпал з протидіючою напругою. Технологічний процес волочіння характеризувався високим ступенем стабільності та задовільним захопленням мастила в осередок деформації (волокни), про що свідчив темно-матовий колір поверхні дроту. Механічні властивості та вимоги до холоднодеформованої арматури діаметром 9,6 мм представлені у табл. 6.

Слід зазначити, що виготовлення холоднодеформованої арматури періодичного профілю дозволяє при армуванні залізобетонних шпал скоротити витрати металу на $\sim 7\%$ та значно спростити технологічний режим виробництва – замість 44 холоднодеформованих арматурних дротів типу 3,0Вр1400К-Р1 можливо використовувати 4 одиниці арматури діаметром 9,6 мм класом міцності 1400 МПа. Таким чином, з метою подальшого здешевлення собівартості виробництва холоднодеформованої стабілізованої арматури діаметром 9,6 мм необхідно використовувати бунтовий прокат зі сталі С86D діаметром 15,0–16,0 мм, виготовлення якого потребує модернізації систем повітряного охолодження розташованих на транспортері лінії Стелмор [9].

В світовій практиці сучасного будівництва використання арматурного прокату з високовуглецевих сталей складає до 50 % від загальної потреби в арматурних сталях [12]. В Україні та країнах ближнього зарубіжжя виробництво холоднодеформованої арматури з високовуглецевої сталі вельми обмежене і складає не більше 5 % від загального обсягу споживання.

Безперечним є і те, що один з критеріїв ефективного використання різноманітних попередньо-напружених залізобетонних конструкцій полягає в можливості підвищення їх конструктивної міцності. Це обумовлює не тільки збільшення надійності та довговічності конструкцій, але й зменшення металоємності самого будівництва.

Таблиця 2. Механічні властивості холоднодеформованої стабілізованої арматури зі сталі С86D

Діаметр прокату/діаметр арматури, мм	Клас міцності, МПа	Маркування	Розривне зусилля, МПа	Зусилля ($R_{0,2}$), МПа	Відносне видовження, δ_{100} , %	Число перегинів
8,0/5,0	1400	5,0Вр1400-Р1	<u>34200–35500</u> 34850	<u>31600–31800</u> 31700	<u>5,0–5,0</u> 5,0	<u>5,0–10,0</u> 7,5
10,0/5,0	1400	5,0Вр1400-Р1	<u>36300–37300</u> 36800	<u>33540–34460</u> 34000	<u>4,5–5,0</u> 4,75	<u>3–5</u> 4
10,0/6,0	1400	6,0Вр1400-Р1	<u>49200–50800</u> 50000	<u>43610–43780</u> 43695	<u>5,0–5,5</u> 5,25	-

Примітка: * – у чисельнику вказані мінімальне і максимальне значення, в знаменнику – середнє

Таблиця 3. Вимоги до механічних властивостей холоднодеформованої арматури за національними стандартами

Діаметр арматури, мм	Клас міцності, МПа	Маркування	Розривне зусилля, МПа	Зусилля ($R_{0,2}$), МПа	Відносне видовження, δ_{100} , %	Число перегинів*
ГОСТ 7348-81						
5,0	1400	5,0Вр1400-Р1	32800	27500	4	5(3)
6,0	1400	6,0Вр1400-Р1	47300	39700	5	-
ТУ У 24.3-26209430-027						
5,0	1500	5,0В1500-Р1	32800	28200	4	5

Примітка: * – у дужках вказані значення для арматури періодичного профілю

Таблиця 4. Вимоги до механічних властивостей холоднодеформованої арматури за міжнародними стандартами

Діаметр арматури, мм	Клас міцності, МПа	Нормативне розривне зусилля (F_m), МПа	Розрахункове зусилля ($R_{0,1}$) ¹ , МПа	Відносне видовження, δ_{100} , %	Число перегинів ²
EN 10138-2:2009/BS 5896:1980					
5,0	1670	32700	28800/27800	3,5	4(3)
5,0	1770	34700	30500/29500	3,5	4(3)
6,0	1670	47300	41600/40200	3,5	4(3)
6,0	1770	50100	44100/42600	3,5	4(3)
NEN 3868:2001					
5,0	1770	34700	29800	3,5	3
6,0	1670	47300	40700	3,5	3
MSZ 5720:1993					
5,0	1770	34700	28500	3,5	4
6,0	1770	50100	41000	3,5	3

Примітка: ¹ – розрахункове зусилля $R_{0,1}$, яке становить $0,86 \cdot F_m$; ² – у дужках вказані значення для арматури періодичного профілю

Таблиця 5. Показники якості бунтового прокату зі сталі C82D^V діаметром 14,0 мм

Режим виробництва	Кількість сорбітоподібного перліту, %	Глибина знеуглецьованого шару, %	σ_b , МПа	ψ , %	δ_{10} , %
Дослідний	83, інше перліт 2–3 балу	0,41	1268	28	10

Таблиця 6. Механічні властивості холоднодеформованої арматури зі сталі C82D^V

Показники	Діаметр арматури, мм	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_{10} , %	Число перегинів на оправці діаметром 100 мм
Фактичні дані	9,54	1680	1458	7,3	5
Вимоги згідно з ТУ 0930-011-01115863-2008	9,45–9,81	≥ 1570	≥ 1400	≥ 6	3

Резервом економії при застосуванні арматурного прокату з високовуглецевих сталей є перехід від зварного типу з'єднання внахлест на механічне (гвинтове, конусне, циліндричне), що дозволяє скорочувати витрати металу і підвищувати надійність з'єднань.

Досвід авторів при виробництві високоміцних стабілізованих арматурних канатів діаметром 9,6–18,2 мм з високовуглецевих сталей свідчить про те, що показники міцності у холоднодеформованого прокату на 20–25 % вищі ніж у термічнозмцненого, а втомна міцність становить не менше 2 млн. циклів. В роботі [3] встановлено, що релаксаційна і корозійна стійкість, а також втомна міцність залежать від рівномірності формування структури високовуглецевої сталі, а при досягненні ефективного структурного стану вказані показники відповідають вимогам сучасної нормативної документації. Отже, виробництво високоміцної холоднодеформованої арматури залежить від раціонального поєднання хімічного складу сталі, режимів деформаційно-термічної обробки бунтового прокату у потоці дровових станів, технології холодної пластичної деформації і режимів завершальної обробки (стабілізуючий відпал).

Очевидно, собівартість виробництва арматурного прокату з високовуглецевої сталі істотно нижча за собівартість виробництва термічнозмцненої арматури, що обумовлено відсутністю у складі сталей дорогих легуючих елементів. Вимоги, які пред'являються до механічних властивостей

високоміцної холоднодеформованої арматури, визначають ряд нових підходів до теоретичних та технологічних основ виробництва початкової сировини (бунтового прокату) з високовуглецевої сталі [13]. Результати експериментів дозволяють зробити висновок, що альтернативного шляху підвищення класу міцності арматури діаметром 5,0–9,6 мм, окрім деформаційного зміцнення, на сьогодні не існує, а промислове впровадження енергозберігаючої технології переробки бунтового прокату з використанням способу прямого волочіння за рахунок відсутності калібрування, патентування і повторної підготовки поверхні прокату до волочіння є цілком обґрунтованим та економічно доцільним. За всіма показниками якості виготовлена стабілізована холоднодеформована арматура діаметром 5,0–6,0 мм відповідає вимогам національних та світових стандартів.

Висновки. Розроблена енергозберігаюча технологія виробництва стабілізованої холоднодеформованої арматури зі сталі C86D (5,0Bp1400-P1, 6,0Bp1400-P1, 5,0B1500-P1), яка призначена для виготовлення попередньо-напружених залізобетонних конструкцій, в тому числі для виробництва канатів типу 2Л захисних оболонок огороження конструкції локалізуючої системи безпеки атомних електростанцій. Виготовлена за експериментальною технологією холоднодеформована арматура за тимчасовим опором розриву відповідає класу міцності 1770 МПа зарубіжних стандартів EN 10138-2:2009, BS 5896:1980,

NEN 3868:2001 та MSZ 5720:1993. Встановлена можливість виготовлення стабілізованої холоднодеформованої арматури діаметром 9,6 мм зі сталі C82D^V за скороченою технологічною схемою, що дозволяє при армуванні залізобетонних шпал скоротити витрати металу на ~ 7 %. Зі збільшенням діаметру бунтового прокату, особливо великих діаметрів, суттєво знижується його фактична швидкість охолодження, а тому є актуальними подальші дослідження пов'язані з необхідністю модернізації на металургійних підприємствах України дуттєвих вентиляторних систем, які розташовані на транспортері лінії Стелмор. Це забезпечить можливість виготовлення холоднодеформованої арматури зі сталі C86D діаметром 9,6 мм з бунтового прокату діаметром 15,0–16,0 мм і дозволить суттєво скоротити собівартість виготовлення металопродукції у порівнянні зі сталлю C82D^V.

Список літератури

- Белалов Х. Н., Клековкин А. А., Клековкина Н. А., Гун Г. С., Корчунов А. Г., Полякова М. А. *Стальная проволока*. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2011. 689 с.
- Parusov E. V., Parusov V. V., Sychkov A. B., Klimenko A. P., Sagura L. V., Sivak A. I., Development of energy- and resource-saving production technology of high-strength strands. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 5. pp. 100–104.
- Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / под ред. М. В. Чукина. Москва: Металлургиздат, 2014. 276 с.
- Тушинский Л. И., Батаев А. А., Тихомирова Л. Б. *Структура перлита и конструктивная прочность стали*. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. 280 с.
- Счастливцев В. М., Мирзаев Д. А., Яковлева И. Л. *Перлит в углеродистых сталях*. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 311 с.
- Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г., Мешков Ю. Я. *Прочность и пластичность холоднодеформированной стали*. Киев: Наукова думка, 1974. 232 с.
- Парусов Э. В., Губенко С. И. Использование инновационных решений при реализации экологически чистой ресурсосберегающей технологии переработки бунтового проката на метизном переделе / *Международная научно-техническая конференция «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении»*, Одесса, 21–23 сентября, 2016. С.147–149.
- Парусов Э. В., Губенко С. И. Технологии изготовления холоднодеформированной проволоочной арматуры с использованием способа прямого волочения / *Научные чтения им. чл.-корр. РАН И. А. Оdinga «Механические свойства современных конструкционных материалов»*, Москва, 6–7 сентября, 2016. С. 100.
- Парусов Е. В., Сичков О. Б., Губенко С. И., Малашкін С. О., Сагура Л. В. Про ефективні шляхи вдосконалення режимів регульованого повітряного охолодження бунтового прокату в промислових умовах. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2017. № 3. С. 1–5.
- Parusov E. V., Parusov V. V., Sagura L. V., Derevyanchenko I. V., Dolgiy S. V., Gremechev S. A., Demyanova L. I. Development of thermomechanical treatment of coil rolled products made of steel C86D micro-alloyed with boron. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 6. pp. 70–74.
- Парусов Э. В., Клименко А. П., Луценко В. А., Чуйко И. Н., Сагура Л. В., Сивак А. И. Влияние температуры нагрева на кинетику распада аустенита высокоуглеродистой стали C82D^V. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 1 (80). С. 34–42.
- Мадатян С. А. *Арматура железобетонных конструкций*. Москва: Воентехлит, 2000. 256 с.
- Губенко С. И., Парусов Э. В. *Пластичность сплавов с различной структурой*. Учебное пособие по физическим основам пластичности. Germany-Mauritius: Palmarium Academic Publishing. 2017, – 192 с
- Belalov H. N., Klekovkin A. A., Klekovkina N. A., Gun G. S., Korchunov A. G., Polyakova M. A. *Stalnaya provoloka* [Steel wire]. Magnitogorsk, MG TU im. G. I. Nosova, 2011. 689 p. (in Russian).
- Parusov E. V., Parusov V. V., Sychkov A. B., Klimenko A. P., Sahura L. V., Sivak A. I., Development of energy- and resource-saving production technology of high-strength strands. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. No 5. pp. 100–104 (in England).
- Proizvodstvo vyisokoprochnoy stalnoy armatury dlya zhelezobetonnykh shpal novogo pokoleniya [Production of high-strength steel reinforcement for concrete sleepers of the new generation] / pod red. M. V. Chukina. Moscow, Metallurgizdat, 2014. 276 p. (in Russian).
- Tushinskiy L. I., Bataev A. A., Tihomirova L. B. *Struktura perlita i konstruktivnaya prochnost stali* [Perlite structure and structural strength of steel]. Novosibirsk, VO “Nauka”, Sibirskaya izdatelskaya firma, 1993. 280 p. (in Russian).
- Schastlivtsev V. M., Mirzaev D. A., Yakovleva I. L. *Perlit v uglerodistykh stalyah* [Perlite in carbon steels]. Ekaterinburg, UrO RAN, 2006. 311 p. (in Russian).
- Gridnev V. N., Gavrilyuk V. G., Meshkov Yu. Ya. *Prochnost i plastichnost holodnodeformirovannoy stali* [Strength and ductility of cold-rolled steel]. Kiev, Naukova dumka, 1974. 232 p. (in Russian).
- Parusov E. V., Gubenko S. I. Ispolzovanie innovatsionnykh resheniy pri realizatsii ekologicheskii chistoy resursosberegayushey tehnologii pererabotki buntovogo prokata na metiznom pereделе [The use of innovative solutions in the implementation of environmentally friendly resource-saving technologies for the processing of riot rolled metal at the redistribution industry]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Novyye i netraditsionnyye tehnologii v resurso- i energosberezenii"* [International Scientific and Technical Conference "New and Non-Traditional Technologies in Resource and Energy Saving"], Odessa, 21–23 sentyabrya, 2016. pp.147–149 (in Russian).
- Parusov E. V., Gubenko S. I. Tehnologii izgotovleniya holodnodeformirovannoy provolochnoy armatury s ispolzovaniem sposoba pryamogo volocheniya [Technologies for Manufacturing Cold-Deformed Wire Armature Using the Direct Drawing Method]. *Nauchnyye chteniya im. chl.-korr. RAN I. A. Odinga "Mekhanicheskie svoystva sovremennykh konstruktivnykh materialov"* [Scientific Readings. Corr. RAS I. A. Odinga “Mechanical properties of modern structural materials”], Moscow, 6–7 sentyabrya, 2016. p. 100 (in Russian).
- Parusov E. V., Sychkov O. B., Gubenko S. I., Malashkin S. O., Sahura L. V. Pro effektivni shliahy vdoskonalennia rezhimiv reguliovanogo povitriannogo oholodzhennia buntovogo prokату v promyslovyykh umovakh [On effective ways to improve the modes of regulated air cooling riot rolling in industrial conditions]. *Naukovi pratsi Vinnytskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universitetu* [Scientific works of Vinnytsia National Technical University], 2017. No 3. pp. 1–5 (in Ukrainian).
- Parusov E. V., Parusov V. V., Sahura L. V., Sivak A. I., Klimenko A. P., Sychkov A. B. Development of thermomechanical treatment of coil rolled products made of steel C86D micro-alloyed with boron. *Metallurgical and Mining Industry*, 2016. No 6. pp. 70–74 (in England).
- Vliianie temperatury nagreva na kinetiku raspada austenita vysokouglerodistoi stali C82D^V [Influence of the heating temperature on the kinetics of the collapse of the high-carbon austenite steel C82D^V]. *Metallurgical and Mining Industry*. 2018, No 1 (80). pp. 34–42 (in Russian).
- Madatyan S. A. *Armatura zhelezobetonnykh konstruktii* [Armature of reinforced concrete structures]. Moskwa, Voentehlit, 2000. 256 p. (in Russian).
- Gubenko S. I., Parusov E. V. *Plastichnost splavov s razlichnoy strukturoy*. Uchebnoe posobie po fizicheskim osnovam plastichnosti [Plasticity of alloys with different structure. A manual on the physical fundamentals of plasticity]. Germany-Mauritius: Palmarium Academic Publishing. 2017, 192 p. (in Russian)

Надійшло (received) 27.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Парусов Едуард Володимирович (Парусов Эдуард Владимирович, Parusov Eduard Vladimirovich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувачий відділом термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії НАН України; м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>, e-mail: tometal@ukr.net

Губенко Світлана Іванівна (Губенко Светлана Ивановна, Gubenko Svetlana Ivanovna) – доктор технічних наук, професор кафедри «Матеріалознавство» Національної металургійної академії України; м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5427-1154>, e-mail: sigubenko@gmail.com

Парусов Олег Володимирович (Парусов Олег Владимирович, Parusov Oleh Vladimirovich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії НАН України; м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>, e-mail: termet@ukr.net

Чуйко Ігор Миколайович (Чуйко Игорь Николаевич, Chuiiko Ihor Nikolaevich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії НАН України; м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>, e-mail: ferrospav@ukr.net